



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DEL BRUÑIDO HIDROSTÁTICO POR BOLA EN LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DEL INCONEL® 718 Y DEL Ti6Al4V

P. FERNÁNDEZ-LUCIO¹, G. GÓMEZ-ESCUADERO¹, A. DEL OLMO^{1,2}, F. MARIN², A. RODRÍGUEZ², L.N. LÓPEZ DE LACALLE^{1,2}

¹Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
Escuela de Ingeniería de Bilbao, Departamento Ingeniería Mecánica
Plaza Ingenieros Torres Quevedo s/n, 48013 Bilbao, España

²Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica (CFAA)
Parque Tecnológico de Bizkaia-Ed.202, 480170, Zamudio, España

(Recibido 15 de septiembre de 2020, para publicación 7 de enero de 2021)

Resumen – Los procesos de súper-acabado, como el bruñido hidrostático por bola, mejoran la calidad superficial de los componentes y generan tensiones residuales compresivas que pueden aumentar el rendimiento y la vida útil de las piezas a los que se les aplica estas tecnologías. Una de las principales ventajas de la tecnología del bruñido hidrostático por bola es que puede ser integrada directamente en los centros de mecanizado. De esta manera, se reducen los tiempos y los errores derivados de cambios de amarre o necesidades de utillajes específicos. Además, al tratarse de un proceso en el que una bola rueda sobre una superficie, las velocidades de avance que se pueden alcanzar pueden llegar a ser muy altas (incluso la máxima permitida por la máquina), reduciéndose, considerablemente, los tiempos de mecanizado y de operaciones de acabado. En este estudio se ha analizado los parámetros de bruñido que minimizan la rugosidad superficial en componentes hechos de las superaleaciones termorresistentes Inconel® 718 y Ti6Al4V. Se ha evaluado la influencia de la presión hidrostática del bruñido sobre el material. Para ello, los ensayos se han realizado con dos niveles de presión hidrostática. Se ha comprobado que con el uso de 30 MPa es posible mejorar la calidad superficial S_2 hasta un 51% para el Inconel® 718 y un 81% en la aleación de titanio.

Palabras clave – Bruñido hidrostático por bola, rugosidad, Inconel® 718, Ti6Al4V.

1. INTRODUCCIÓN

El sector aeronáutico es de los más exigentes en cuanto a la fabricación se refiere. Esto se debe, en gran medida, a los altos requerimientos tanto geométricos como superficiales y mecánicos requeridos para validación y fiabilidad durante su funcionamiento. En el caso concreto de los motores aeronáuticos, donde sus componentes son piezas consideradas como críticas, pues están sometidas a altos esfuerzos mecánicos y térmicos, se utilizan aleaciones termorresistentes de base níquel-cobalto y de titanio. Los altos costos de materia prima, dificultad de fabricación y requisitos termo-mecánicos, hacen de sus componentes productos de muy alto valor añadido. Esto supone que álabes, NGVs y discos que componen el motor exigen una alta calidad y precisión a la hora de fabricarse.

Además, componentes del motor como los álabes, traen consigo una variable más a tener en cuenta: su rugosidad superficial. Esto se debe a que, como varios estudios demuestran, el rendimiento aerodinámico de los mismos depende en gran parte de la rugosidad de su superficie: Bai *et al.* [1] observaron que las superficies rugosas implican mayores pérdidas aerodinámicas en los álabes; a su vez, Boynton *et al.* [2] concluyeron que la eficiencia de una turbina es mayor cuanto menor es la rugosidad en sus álabes. Por ello, esta clase de componentes suponen un mayor reto en cuanto a la fabricación se refiere.

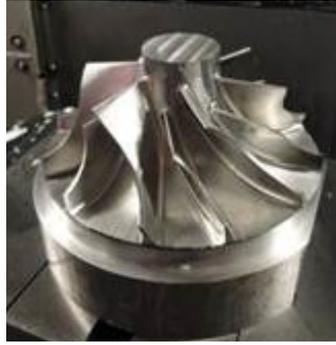


Fig. 1. *Impeller* de Ti6Al4V tras operación de copiado de bola.

Para cumplir las especificaciones de diseño, los componentes aeronáuticos pasan por diversas etapas de fabricación, a citar desbaste, semi-acabado y acabado. La etapa que más tiempo de fabricación consume es la operación de acabado en la que normalmente se utiliza una fresa de bola. En materiales de difícil maquinabilidad, como los usados en motores aeronáuticos, el copiado de bola suele requerir mayor tiempo de mecanizado [3] y todavía puede ser necesario otros procesos para mejorar, a niveles aceptables, la calidad superficial.

Dependiendo de la estrategia utilizada durante el copiado de bola, distintas cualidades superficiales pueden ser obtenidas ya que la complejidad geométrica de los componentes obliga a realizar un mecanizado en 5 ejes. El cambio de contacto entre herramienta y superficie de la pieza da como resultado regiones con diferentes calidades superficiales [4]. Por tanto, es necesario de más tiempo de pos-proceso para alcanzar un superacabado [5].

Sin embargo, la rugosidad obtenida con procesos de mecanizado convencionales puede ser mejorada mediante el uso de otras técnicas de súper-acabado, como es el bruñido. El uso combinado de estas técnicas tras el proceso de acabado ofrece alguna ventaja extra frente a usar únicamente operaciones de acabado tradicionales.

Las operaciones de bruñido reducen la rugosidad superficial a través de la deformación plástica del material en frío. Actualmente, los principales procesos de bruñido son el bruñido con rodillo y el bruñido hidrostático por bola [6]. La característica principal de estas técnicas yace en que, además de mejorar la calidad de la superficie, también pueden generar tensiones residuales compresivas en la pieza, lo cual puede aumentar el rendimiento y su vida útil debido a una mejora a la resistencia a la fatiga mecánica, algo muy beneficioso para los componentes aerodinámicos del motor aeronáutico [7]. De acuerdo con *Hua et al.* [8], que estudió el efecto del bruñido hidrostático por bola en Inconel® 718, se aprecia una mejoría en la calidad superficial al aumentar la presión de bruñido de 12 a 18MPa. Además, observó que un aumento de la dureza superficial de un 15% se traduce en una mejora del fallo por fatiga mecánica de un 83%.

Dentro de las técnicas de súper-acabado, el bruñido hidrostático por bola ofrece mayores ventajas frente al resto. En primer lugar, esta técnica se puede aplicar directamente en la misma máquina en la que se haya hecho el proceso de acabado [6]. Esto implica una reducción en tiempos de traslado de la pieza y, lo que es más importante, se quitan los errores de posicionamiento y fijación en procesos multi-máquina, algo primordial en componentes con restricciones geométricas tan restrictivas. Además, es un proceso de deformación de material y no de corte. Se basa en hacer rodar bajo presión una bola de metal duro o cerámica sobre una superficie. Mediante esta deformación plástica, se produce un desplazamiento del material haciendo que los picos de rugosidad rellenen los huecos de los valles, disminuyendo de esta forma la rugosidad superficial. En esta operación, la velocidad de la herramienta con respecto a la superficie puede ser mucho mayor, incluso puede llegar al máximo que permite la máquina. Por último, en algunas ocasiones, se puede prescindir de la operación de acabado y sustituirla por el bruñido hidrostático por bola. De esta forma, se consigue un gran ahorro de tiempo de fabricación del componente ya que se prescindiría de una operación que requiere de mucho tiempo de mecanizado.

La clave para la correcta implementación del bruñido hidrostático por bola radica en el conocimiento de la influencia de los parámetros del proceso en la pieza y en la elección adecuada de los mismos en función del resultado deseado. Para el caso de obtener una mejoría en la rugosidad superficial entre las variables más relevantes se encuentran la presión y fuerza de bruñido, el diámetro de la bola y la velocidad de bruñido.

La presión de bruñido se corresponde con la presión que ejerce el fluido en el interior de la herramienta y es la encargada de controlar la fuerza de bruñido que se aplica sobre la pieza. Un aumento de la presión, incrementa significativamente la profundidad que alcanza la bola, aunque existe un límite a partir del cual no hay mejora apreciable [9]. En lo concerniente a la rugosidad, los trabajos establecen diferentes visiones. Por un lado, los estudios de Klocke *et al.* [10] y de Luca *et al.* [11] apuntan que la presión no tiene una excesiva influencia en la rugosidad. Por el contrario, El-Taweel y El-Axir [12] y Swirad y Wdowik [13] establecen que una mayor fuerza de bruñido reduce la rugosidad superficial, siempre que no se sobrepase un límite a partir del cual la rugosidad vuelve a aumentar. Como una mayor presión también supone una mayor fuerza de bruñido y viceversa, no queda claro cuál es su influencia en la rugosidad.

El diámetro de la bola también afecta a las fuerzas que se desarrollan en el bruñido, a mayor diámetro de bola, hay una mayor área de contacto bola-superficie y, por tanto, una mayor fuerza para la misma presión. Esto resulta en mayores tensiones residuales a compresión en el componente, pero mayores huellas de la bola en la superficie. Por tanto, se obtiene una mejor rugosidad superficial con bolas de menor diámetro. Por último, está la velocidad de bruñido que influye en la rugosidad de la pieza, obteniendo menor rugosidad a una mayor velocidad. Existe un rango óptimo de velocidad por encima del cual el acabado superficial se deteriora, por ello no se considera un valor tan relevante como la presión y fuerza de bruñido [14]. En un segundo plano, también afecta al tiempo del proceso [15].

Por todo ello, en este estudio se ha realizado un análisis sobre la influencia que tiene la presión aplicada en el bruñido hidrostático en materiales termo-resistentes y de difícil maquinabilidad usados en componentes aeronáuticos como el Inconel® 718 y el Ti6Al4V.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

Los ensayos se han llevado a cabo en un centro de mecanizado KONDIA® HS1000 de 18 kW de potencia. Consta de tres ejes lineales y un plato divisor que proporciona dos ejes rotativos extra. Fueron utilizadas en este estudio probetas de geometría prismática de $20 \times 20 \times 10$ mm. En la Fig. 2 se presenta el montaje de una de las probetas antes de ser bruñida. Para realizar el bruñido hidrostático por bola se ha utilizado una herramienta especial de bruñido con bola cerámica HG6-19E90-ZS20-X, así como una bomba hidráulica del mismo fabricante HGP 6.5 Ecoroll con la que se puede regular la presión que ejerce la bola cerámica sobre la superficie durante el proceso de bruñido.

Para evaluar los efectos de las distintas presiones sobre las piezas, fueran preparadas las superficies con un fresado de bola previo, simulando el proceso de acabado de un componente. Para ello se han usado

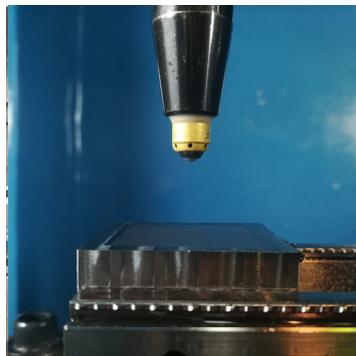


Fig. 2. Montaje de una de las probetas en la máquina.

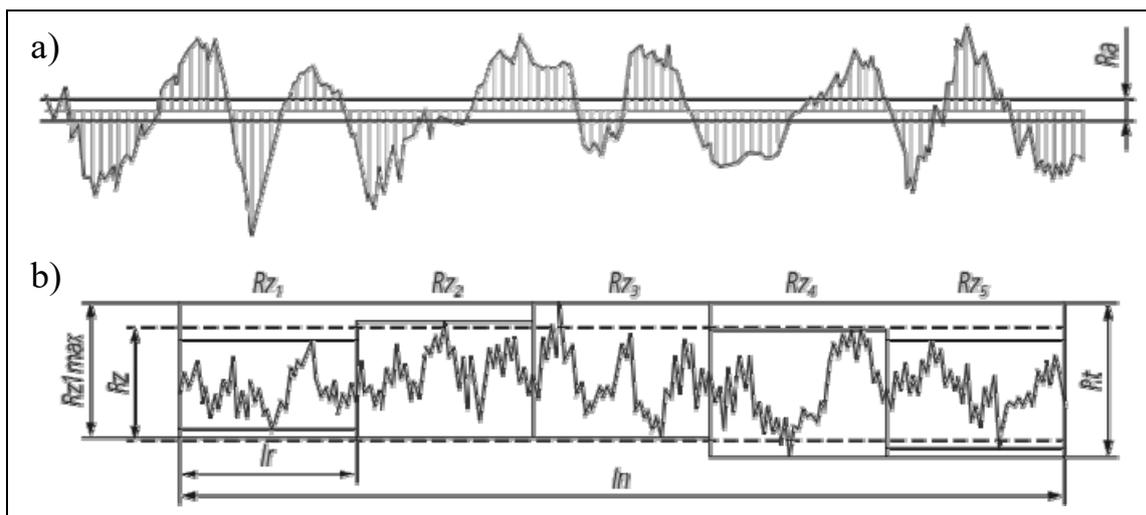
Tabla 1. Parámetros de corte del fresado previo.

| Material | Fresa | Diámetro [mm] | v_c [m/min] | f_z [mm/(r·z)] | z [-] | a_p [mm] | a_e [mm] |
|--------------|--------------|---------------|---------------|------------------|---------|------------|------------|
| Inconel® 718 | PPH 1600-CL1 | 16 | 45 | 0,20 | 2 | 0,20 | 0,20 |
| Ti6Al4V | VF4SVBR0600 | 12 | 150 | 0,16 | 2 | 0,20 | 0,20 |

fresas de bola recomendadas por los fabricantes para cada uno de los materiales, obteniendo la mejor calidad superficial posible. La estrategia seguida durante el fresado ha sido un mecanizado en *zig-zag* en el caso del Inconel® 718 y en *zig* para el Ti6Al4V, estrategias empleadas industrialmente en el sector para cada uno de los materiales. Los parámetros de corte utilizadas para la operación de acabado previa así como las fresas usadas para ello se especifican en la Tabla 1.

El diámetro de la bola utilizada para el bruñido ha sido de 6 mm y, en el caso de la anchura de pasada radial, se ha fijado en 0,05 mm para obtener una buena relación entre acabado superficial final y tiempo de operación. Se eligió para operación de bruñido la estrategia en *zig-zag* en perpendicular a la operación de fresado pues se obtiene de esta forma la mejor calidad superficial [9]. Esta estrategia tiene un tiempo de proceso más corto y, a diferencia del mecanizado, el bruñido no presenta diferencias de acabado como en corte en concordancia y en oposición. Se ha fijado la velocidad de avance en 2000 mm/min para ambos materiales y las presiones hidrostáticas de 10 MPa y 30 MPa.

Una vez acabado el proceso de bruñidos, las probetas, tanto las de referencia (únicamente fresadas) como las bruñidas a las distintas presiones, han sido escaneadas con un microscopio óptico confocal Leica DCM3D con una resolución de 0,1 nm. De las superficies escaneadas se han obtenido los parámetros de rugosidad superficial S_a y S_z acorde con la norma ISO 25178: 2016. Utilizando las topografías de la superficie fueron sacados, aleatoriamente, tres perfiles de rugosidad en la dirección perpendicular a la más desfavorable (donde tenemos las mayores alturas de cresta) y, se ha calculado los parámetros de rugosidad R_a y R_z de acuerdo con la norma ISO 4287: 1997 (ver Fig. 3). El parámetro R_a indica la rugosidad media de un perfil. Suele venir acompañado del parámetro R_z para completar la información que aporta ya que el valor de la media de por sí solo no indica cómo es un perfil y, al incluir el R_z , la medida de rugosidad es más completa. Sin embargo, esta información que nos dan estos dos parámetros no es completa puesto que se reducen a un único perfil y no reflejan el total de la topografía. Por ello, se ha decidido

Fig. 3. Cálculo de la R_a (a) y de la R_z (b) de acuerdo con la norma ISO 4287:1997 [16].

incluir los parámetros de rugosidad superficial S_a y S_z . El parámetro S_a refleja la rugosidad media de toda la superficie analizada, mientras que el S_z nos da la suma del valle más profundo de toda la superficie y el pico más elevado. Por consiguiente, este último parámetro da mayores valores que el R_z y no resulta ser del todo fiable sin ver la topografía ya que puede ser algo puntual. Aun así, resulta muy útil para algunas aplicaciones.

3. RESULTADOS

En la Fig. 4 se muestran las topografías de las superficies de referencia y bruñidas a 10 MPa y 30 MPa en Inconel® 718.

Como se puede apreciar, mediante la aplicación del proceso de bruñido se consiguen disminuir de manera notable las crestas que deja el fresado previo. Además, cuanto mayor es la presión de aplicación, mayor es la disminución de la altura de los picos de rugosidad.

Al igual que en el caso del Inconel® 718, el bruñir la superficie previamente fresada de Ti6Al4V genera una gran reducción de la amplitud de los picos, tal y como se puede observar en la Fig. 5.

Sin embargo, en este material se pueden distinguir dos pequeñas diferencias en comparación con el Inconel® 718. En primer lugar, que la disminución de la altura de los picos es ya muy grande bruñendo con la presión más baja y apenas hay gran diferencia al bruñir con 30 MPa. En segundo lugar, se pueden apre-

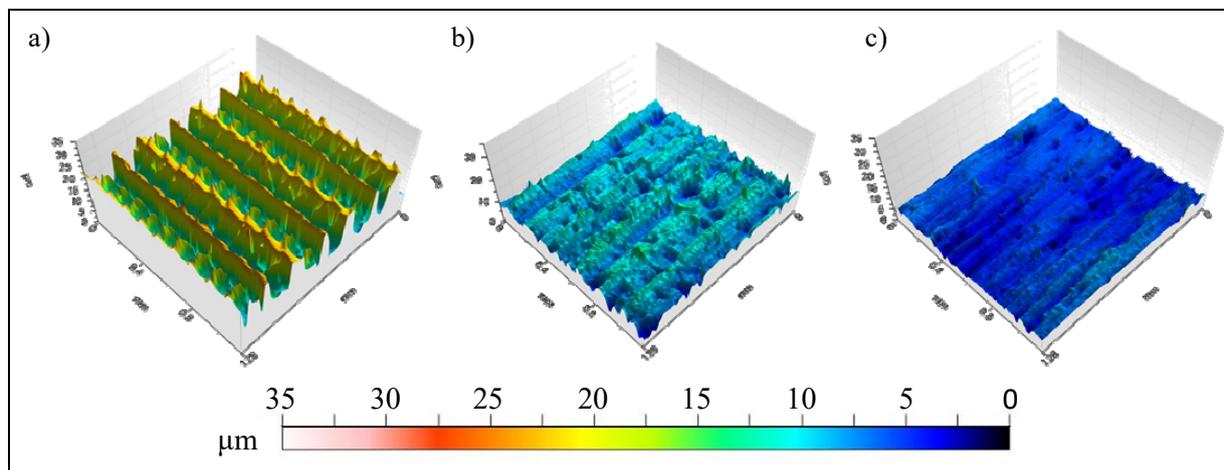


Fig. 4. Topografías de las superficies en Inconel® 718. (a) Referencia. (b) Bruñida a 10 MPa y (c) Bruñida a 30 MPa.

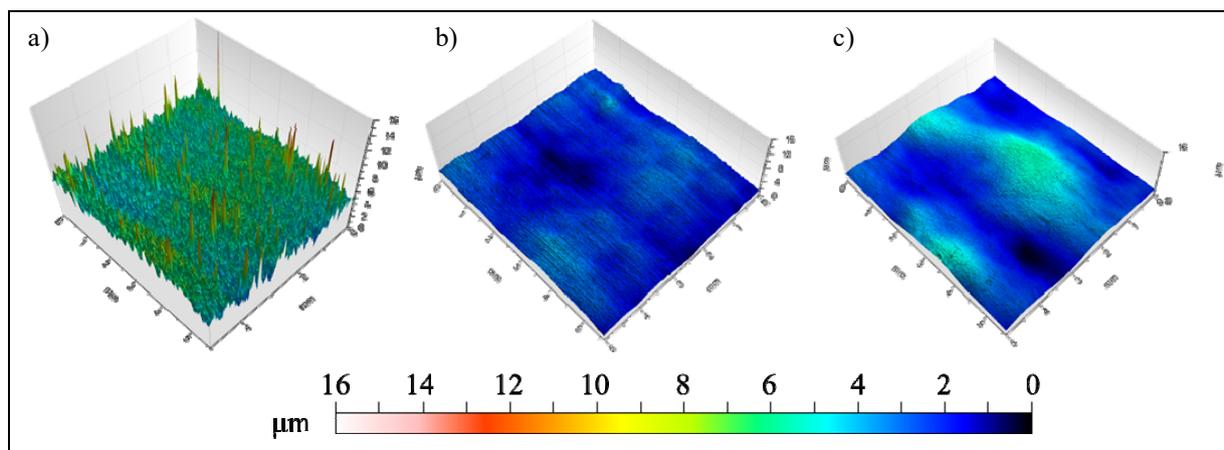


Fig. 5. Topografías de las superficies en Ti6Al4V. (a) Referencia. (b) Bruñida a 10 MPa y (c) Bruñida a 30 MPa.

ciar pequeñas deformaciones en la superficie de la pieza (de 2 a 4 μm) en forma de montículos. Esto se debe a que el Ti6Al4V tiene un menor módulo de elasticidad que el Inconel® 718 y, por tanto, ha llegado a sufrir deformaciones plásticas que se pueden apreciar con un microscopio.

En cuanto a los valores de rugosidad de las superficies escaneadas, se presenta en la Fig. 6 la comparación en los dos materiales de la R_a , R_z , S_a y S_z de la superficie fresada designada como de referencia frente a las bruñidas con 10 MPa y 30 MPa de presión. Como se puede apreciar, el proceso de bruñido mejora considerablemente los parámetros de rugosidad estudiados.

En el Inconel®718 los parámetros de rugosidad R_a , R_z , S_a y S_z mejoran a una presión de 10 MPa un 61%, 59%, 71% y 20% respectivamente. Esta mejoría es aún mayor para el caso del bruñido a una presión 20 MPa mayor, ya que asciende hasta un 81%, 75%, 81% y 51% respectivamente en comparación con la superficie fresada.

En el caso del Ti6Al4V, a pesar de lograrse unos mejores acabados superficiales ya desde la superficie fresada, se siguen obteniendo considerables mejorías en las rugosidades tras la operación de bruñido. Para el caso de utilizar una presión de 10 MPa, los cuatro parámetros de rugosidad estudiados descienden aproximadamente un 72%. A su vez, usando 30MPa de presión, los parámetros de R_a , R_z y S_a se reducen en más de un 80%, mientras que la S_z desciende únicamente un 64%. Este descenso en la mejoría en comparación con el aumento de R_z se debe a que el parámetro S_z se obtiene al sumar el mayor pico con la mayor profundidad que haya en la superficie. Por consiguiente, estos dos valores pueden no estar en un mismo perfil lo que hace que se pueda obtener un valor más elevado de S_z que en el caso de R_z .

Por consiguiente, tanto en el caso del Inconel® 718 como en el del Ti6Al4V se ha corroborado lo expuesto por El-Taweel y El-Axir [12] en sus estudios. Además, en el caso del bruñido en Ti6Al4V, la presión de 30 MPa se encuentra cerca de ese valor límite de la presión a partir de la cual la rugosidad empeora, ya que se ha obtenido una pequeña deformación en la superficie de la probeta haciendo que el valor de S_z disminuya menos que a la presión de 10 MPa.

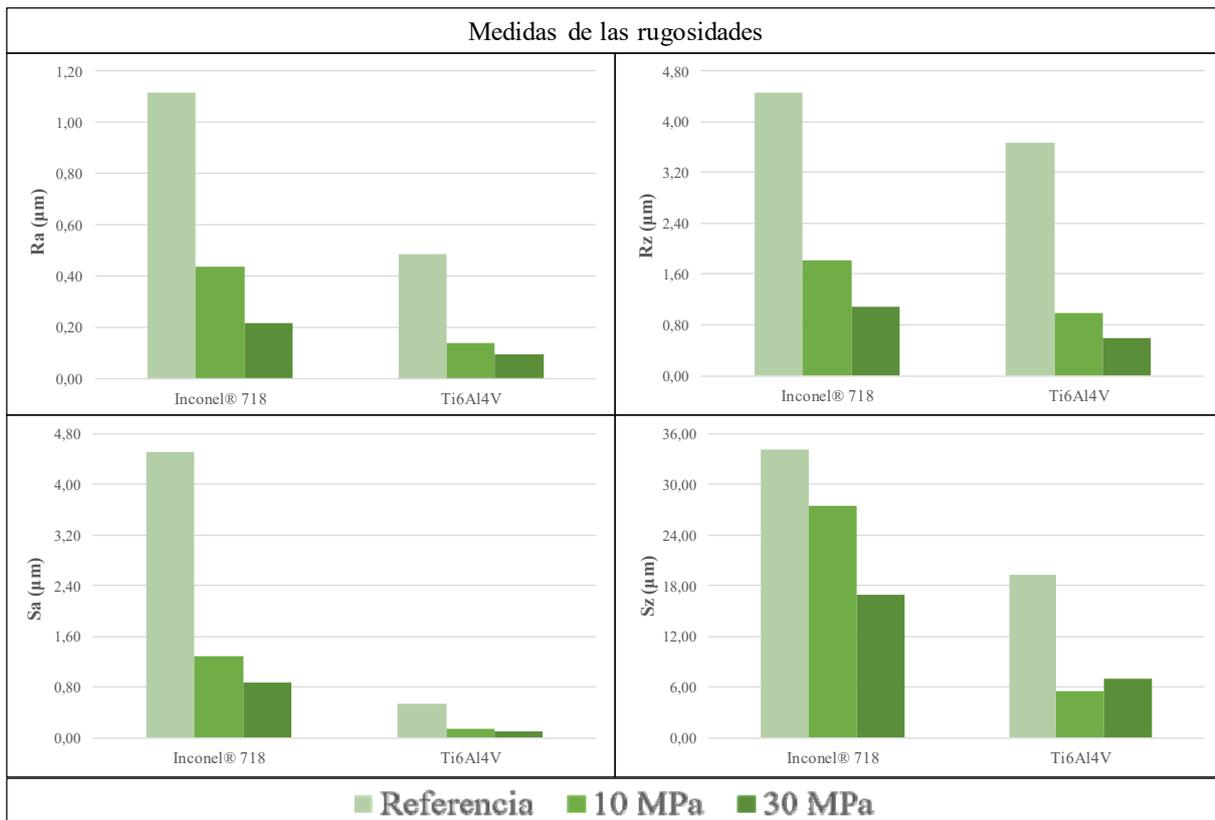


Fig. 6. Medidas de las rugosidades en los dos materiales.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha estudiado la influencia que tiene el parámetro de la presión en el proceso de bruñido hidrostático por bola en materiales termo-resistentes usados en componentes del motor aeronáutico como lo son el Inconel® 718 y el Ti6Al4V. Tras realizar una serie de ensayos, se han llegado a las siguientes conclusiones:

- El bruñido hidrostático por bola mejora, de forma considerable, la rugosidad superficial de una pieza previamente fresada utilizando parámetros de corte recomendados por fabricantes de herramienta de una operación de acabado tanto en Inconel® 718 como en Ti6Al4V.
- Para el material Inconel® 718 se ha obtenido una mejoría en los parámetros de rugosidad R_a , R_z , S_a y S_z de hasta 81%, 75%, 81% y 51% respectivamente.
- En el caso del Ti6Al4V, esta mejoría ha superado el 80% en los parámetros R_a , R_z y S_a a 30MPa de presión. Sin embargo, el parámetro S_z ha disminuido en menor porcentaje que usando una presión de 10 MPa.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha llevado a cabo gracias a la colaboración con los proyectos PROCODA (Procesos de Alto Valor Basados en el Conocimiento y los Datos) Elkartek tipo 1: KK-2019/00004, al proyecto IT1337-19 del Gobierno Vasco y al proyecto Mineco DPI2016-74845-R.

Los autores también quieren agradecer al vicerrector de innovación, compromiso social y acción cultural de la UPV/EHU (programa Bizialab del Gobierno Vasco) y a la propia UPV/EHU por la ayuda financiera por la beca pre-doctoral PIF 19/96.

REFERENCIAS

- [1] Bai, T., Liu, J., Zhang, W., Zou, Z., “Effect of surface roughness on the aerodynamic performance of turbine blade cascade”, *Propuls. Power Res.*, **3**(2), 82–89 (2014), doi: 10.1016/j.jprr.2014.05.001
- [2] Boynton, J.L., Tabibzadeh, R., Hudson, S.T., “Investigation of rotor blade roughness effects on turbine performance”, *J. Turbomach.*, **115**(3), 614–620, 1993, doi: 10.1115/1.2929298
- [3] Calleja A., *et al.*, “Blisk blades manufacturing technologies analysis”, *Procedia Manuf.*, **41**, 714–722 (2019), doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.062
- [4] Ozturk, E., Tunc, L.T., Budak, E., “Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **49**(14), 1053–1062 (2009), doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.07.013
- [5] De Souza, A.F., Machado, A., Beckert, S.F., Diniz, A.E., “Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application”, *Procedia CIRP*, **14**, 188–193 (2014), doi: 10.1016/j.procir.2014.03.089
- [6] Priyadarsini, C., Ramana, V.S.N.V., Prabha, K.A., Swetha, S., “A review on ball, roller, low plasticity burnishing process”, *Materials Today: Proceedings*, **18**, 5087–5099 (2019), doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.505
- [7] R. Avilés, J. Albizuri, A. Rodríguez, L.N. López De Lacalle, “Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel”, *Int. J. Fatigue*, **55**, 230–244, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.06.024
- [8] Hua, Y., Liu, Z., Wang, B., Hou, X., “Surface modification through combination of finish turning with low plasticity burnishing and its effect on fatigue performance for Inconel 718”, *Surf. Coatings Technol.*, **375**, 508–517 (2019), doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.07.057
- [9] Rodríguez Ezquerro, A., “Mejora funcional de superficies en componentes mecánicos mediante bruñido hidrostático con bola”, Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbao, (2015)
- [10] Klocke, F., Bäcker, V., Wegner, H., Feldhaus, B., Baron, H.U., Hessert, R., “Influence of process and geometry parameters on the surface layer state after roller burnishing of IN718”, *Prod. Eng.*, **3**(4–5), 391–399 (2009), doi: 10.1007/s11740-009-0182-0

- [11] Luca, L., Neagu-Ventzel, S., Marinescu, I., “Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels”, *Precis. Eng.*, **29**(2), 253–256, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.precisioneng.2004.02.002.
- [12] El-Taweel, T.A., El-Axir, M.H., “Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **41**(3–4), 301–310 (2009), doi: 10.1007/s00170-008-1485-6
- [13] Swirad, S., Wdowik, R., “Determining the effect of ball burnishing parameters on surface roughness using the Taguchi method”, *Procedia Manufacturing*, **34**, 287–292 (2019) doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.152
- [14] Aviles Ajuria, A., “Modelos de predicción del comportamiento a fatiga de componentes sometidos a tratamientos mecánicos”, Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbao, (2018)
- [15] López De Lacalle, L.N., Lamikiz, A., Muñoa, J., Sánchez, J.A., “Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **45**(15), 1659–1668 (2005), doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.03.007
- [16] Mitutoyo, “Quick guide to surface roughness measurement: Reference guide for laboratory and workshop”, in *Mitutoyo America Corporation*, **1**(2229), 1–8 (2010)

STUDY OF THE INFLUENCE OF HYDROSTATIC BALL BURNISHING PRESSURE ON THE SURFACE ROUGHNESS OF INCONEL® 718 AND Ti6Al4V

Abstract – Superfinishing processes, such as hydrostatic ball burnishing, improve the surface quality of components and generate compressive residual stresses that can increase the performance and service life of parts to which these technologies are applied. One of the main advantages of hydrostatic ball burnishing technology is that it can be integrated directly into machining centres. In this way, time and errors arising from clamping changes or the need for specific tooling are reduced. Moreover, as this is a process in which a ball rolls over a surface, the feed speed that can be reached is very high (even the maximum allowed by the machine), considerably reducing machining and finishing times. This study has analysed the burnishing parameters that minimise surface roughness on components made of the heat-resistant superalloys Inconel® 718 and Ti6Al4V. The influence of the hydrostatic pressure of burnishing on the material was evaluated. For this purpose, the tests were carried out with two levels of hydrostatic pressure. It was found that with the use of 30 MPa it is possible to improve the surface quality S_z by up to 51% for Inconel® 718 and 81% for the titanium alloy.

Keywords – Hydrostatic Ball Burnishing, Roughness, Inconel® 718, Ti6Al4V.